Aus dem physikalischen Institut der Universität Breslau.

Das Lummer-Pringsheimsche Spektral-Flickerphotometer als optisches Pyrometer.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät der Kgl. Universität Breslau

vorgelegt

und mit ihrer Genehmigung veröffentlicht von

Erich Thürmel.

ACAD. LIBRARY BERL

Sonnabend, den 18. Juni 1910, mittags 12 Uhr

im Musiksaale der Universität:

Vortrag: „Über die Bestimmung hoher Temperaturen"

und

Promotion.

Breslau 1910

Druck von Grass, Barth & Comp. (W. Friedrich) 319

Gedruckt mit Genehmigung der hohen philosophischen Fakultät
der Kgl. Universität Breslau.

Referenten: Prof. **Dr. O. Lummer**
und Prof. **Dr. E. Pringsheim.**

Termin der mündlichen Prüfung:
18. Dezember 1909.

Meinen Eltern.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543102_0066

Inhalts-Verzeichnis.

Seite

Ältere Untersuchungen und Folgerungen aus der J. v. Kriesschen Theorie . 7

Plan der eigenen Untersuchung 11

Beschreibung des Apparates 13

Bestimmung der Helligkeitsverteilung im Spektrum der Nernstlampe . . . 15

Bestimmung der Empfindlichkeit 25

Das Spektral-Flickerphotometer als optisches Pyrometer 28

Zusammenfassung der Resultate 37

Könnte man ein Normalspektrum herstellen, in dem die physikalische Energie über alle Wellenlängen gleichmäßig verteilt wäre, so würden doch im Auge gleichbreite Spektralbezirke in den verschiedenen Teilen des Spektrums sehr verschiedene Helligkeitseindrücke hervorrufen: Die Netzhaut besitzt für verschiedene Farben eine verschiedene „Helligkeitsempfindlichkeit". Trägt man die Wellenlängen als Abszissen, die zugehörigen Werte der Intensität als Ordinaten ab, so wird die absolute Intensitätsverteilung in einem „isenergetischen Spektrum"[1]) durch eine Parallele zur λ-Achse dargestellt. Die Helligkeitsverteilung hingegen zeigt krummlinigen Verlauf und weist für eine bestimmte Wellenlänge ein Maximum auf.

Verringert man in einem solchen Spektrum die Intensität für alle Wellenlängen in demselben Verhältnis, so bleibt bis zu einer gewissen Grenze die Helligkeitsverteilung dieselbe. Unterhalb dieser Grenze tritt das Purkinjephänomen[2]) auf, d. h. die Helligkeitskurve verändert ihre Gestalt und zwar verschiebt sich das Helligkeitsmaximum nach dem kurzwelligen Ende zu. Die Erscheinung kehrt sich entsprechend um, wenn man von schwächeren zu stärkeren Intensitäten übergeht. Das Verhältnis der Helligkeiten zweier Farben ist also unter gewissen Bedingungen eine Funktion der Intensität, oder in anderen Worten: Die relative Empfindlichkeit des Auges für verschiedene Farben ändert sich mit der Intensität[3]).

Ältere Untersuchungen und Folgerungen aus der J. v. Kriesschen Theorie[4]).

Die relative Empfindlichkeit für Spektralfarben bei möglichst schwachen Intensitäten ist mittelst der Schwellenmethode[5]) von H. Ebert[6]), A. Pflüger[7]) und A. König[8]) im wesentlichen auf dieselbe Weise bestimmt worden. Der Kollimatorspalt eines Spektrometers wurde von einer konstant brennenden Lichtquelle erleuchtet. In der Brennebene des Fernrohrobjektivs entstand ein reelles Spektrum, aus dem durch einen während sämtlicher Messungen gleich breit gehaltenen Okularspalt ein möglichst schmaler Bezirk aus-

1) K. Schaum, Photochemie und Photographie I. p. 70. 1908.

2) Müller-Pouillet II, „Die Lehre von der strahlenden Energie", bearbeitet von O. Lummer, p. 395, 401, 402. 1907.

3) J. v. Kries. Nagels Handbuch III, p. 176. 1905.

4) Die Angaben darüber sind z. T. dem zitierten Buche von Schaum entnommen.

5) Über Schwellenwerte siehe J. v. Kries l. c p. 19 und Schaum l. c. p. 67.

6) Wiedem. Ann. 33. p. 136. 1888.

7) Drudes Ann. 9. p. 185—208. 1902.

8) Beitr. z. Psych. und Phys. der Sinnesorg. p. 309—388. Hamburg 1891. Königs ges. Abh. zur phys. Optik. p. 144—213. 1903.

geblendet wurde. Bei einer bestimmten Fernrohrstellung, der eine Wellenlänge λ entsprach, wurde dann durch Verengern des Kollimatorspaltes die Helligkeit geschwächt, bis kein Lichtreiz mehr bemerkbar war. Die Empfindlichkeit h_λ für Licht von dieser Wellenlänge ist dann der Spaltbreite b_λ und der Intensität S_λ umgekehrt proportional; also

$$h_\lambda = \frac{k}{b_\lambda \, S_\lambda}.$$

Die Methoden zur Bestimmung der Intensitätsverteilung, die diese Autoren anwenden, sind z. T. nicht einwandsfrei. So hat z. B. Ebert, dem damaligen Standpunkte der Wissenschaft auf diesem Gebiete entsprechend, sehr unzuverlässige Werte erhalten. Außerdem hat er nur fünf Punkte der Empfindlichkeitskurve bestimmt. Auch die Königschen Messungen sind nicht einwandfrei. Bei weitem zuverlässiger sind die Intensitätsbestimmungen von Pflüger, der die Intensitätsverteilung mit der Rubensschen Thermosäule gemessen hat.

Pflüger hat die Empfindlichkeitskurve für eine größere Anzahl von Personen bestimmt. Es ist hier nur eine Versuchsreihe wiedergegeben.

In den Tabellen 1 bis 3 (Fig. 1) sind die Resultate dieser Beobachtungen eingetragen; k ist so gewählt, daß die maximale Empfindlichkeit gleich Eins ist.

Tabelle 1.
H. Ebert.

λ	h_λ
470	0,25
500	0,50
530	1,00
590	0,06
675	0,03

Tabelle 2.
A. Pflüger.

λ	h_λ
413	0,015
428	0,069
443	0,25
461	0,32
472	0,40
483	0,44
495	1,00
510	0,88
525	0,59
542	0,28
583	0,097
639	0,0011
717	0,00004

Tabelle 3.
A. König.

λ	h_λ
430	0,047
450	0,23
470	0,50
490	0,86
505	1,00
520	0,98
535	0,75
555	0,36
575	0,12
590	0,045
605	0,015
625	0,0038
650	0,0005
670	0,0002

Bei sehr schwachen Intensitäten hat darnach die Empfindlichkeitskurve bei verschiedenen Personen ihr Maximum zwischen 495 $\mu\mu$ bis 530 $\mu\mu$. Bei Tab. 1 ist zu bemerken, daß wegen der geringen Anzahl der Messungen die Lage des Maximums nicht genau bestimmt ist.

A. König erweiterte das Gebiet seiner Messungen, indem er die Empfindlichkeit auch bei größeren Intensitäten bestimmte. Er verglich die Helligkeit zahlreicher Spektralgebiete eines Dispersionsspektrums mit einem Vergleichsfelde, dessen Farbe der Wellenlänge $\lambda = 535$ $\mu\mu$ entsprach. Indem er die Intensität des Vergleichsfeldes alle möglichen Werte durchlaufen ließ, konnte er den Vergleich bei verschiedenen Helligkeitsstufen ausführen, von denen einige hier angegeben sind:

Helligkeitsstufe	Helligkeit des Vergleichsfeldes in Meterkerzen
A	0,00072
B	0,012
D	0,74
H	191

Für die Stufen A, D und H sind die gefundenen Werte der Empfindlichkeit in den Tabellen 4 bis 6 eingetragen.

Tabellen 4, 5, 6.

Empfindlichkeit bei den Helligkeitsstufen.

	4.	5.	6.
λ	A	D	H[1])
670	0,00034	0,016	0,057
650	0,0010	0,056	0,24
625	0,0064	0,17	0,54
605	0,023	0,28	0,80
590	0,060	0,41	0,89
575	0,14	0,49	0,90
555	0,38	0,74	1,00
535	0,69	0,96	0,87
530	—	1,00	—
520	0,90	0,96	0,67
509	1,00	—	—
505	0,98	0,86	0,40
490	0,71	0,53	0,24
470	0,47	0,35	—
450	0,22	0,14	—
430	0,061	0,061	—

[1]) Siehe Fig. 1.

Wie man sieht, verschiebt sich das Maximum mit zunehmender Helligkeit nach größeren Wellenlängen zu. Bei großer Helligkeit liegt es ungefähr bei 555 μμ (Fig. 1).

S. P. Langley[1]) hat die Empfindlichkeit bei einer Helligkeitsstufe, die etwa der Königschen Stufe B entspricht[2]), mittels der Sehschärfenmethode gemessen. Nach den Messungen von A. König (Tab. 4 und 5) sollte man das Maximum zwischen 509 und 530 μμ erwarten. Langley hat nur sechs Punkte bestimmt und die Lage des Maximums ist daher nicht genau zu ermitteln. Jedoch zeigt Tab. 7, bezw. die Kurve in Fig. 1, daß es in der Nähe von 550 μμ und zwar eher nach dem roten Ende zu liegt, wie man aus dem Anstieg der Werte sieht.

Tab. 7 (siehe Fig. 1).

λ	hλ
450	0,06
500	0,26
550	1,00
600	0,67
650	0,10
700	0,0056

Dieses abweichende Resultat läßt sich an Hand der J. v. Kriesschen Duplizitätstheorie erklären. Danach sind die lichtempfindlichen Organe des Auges die Stäbchen und Zapfen[3]). Während die Stelle der Retina, mit der wir die Gegenstände beim deutlichen Sehen fixieren — also die fovea centralis und die ihr nächstliegenden Teile der macula lutea — nur Zapfen enthält, befinden sich auf den der macula benachbarten Teilen auch Stäbchen, die in den peripheren Teilen der Netzhaut die Zapfen an Anzahl weit übertreffen. Nach J. v. Kries bilden die Zapfen den farbentüchtigen „Hellapparat", die Stäbchen[4]) hingegen den totalfarbenblinden „Dunkelapparat" des Auges[5]). Bei großen Helligkeiten vermitteln die Zapfen das Sehen, bei schwachen hingegen die Stäbchen. Die Empfindlichkeit der letzteren nimmt im Dunkeln außerordentlich zu (Dunkeladaptation). Die Zapfen zeigen die Eigenschaft der Adaptation in weit geringerem Maße. Eine experimentelle Stütze hat die Theorie durch Versuche von O. Lummer[6]) erhalten.

---

[1]) Amer. J. 36. p. 359. 1888.
Phil. Mag. p. 1—23. 5. 7. 89.

[2]) Nach Schaum, l. c. p. 72.

[3]) Müller-Pouillet-Lummer II, p. 339. 1907.

[4]) und eventuell der Sehpurpur. J. v. Kries, l. c. p. 267.

[5]) J. v. Kries, l. c. p. 185—188.

[6]) O Lummer, „Experimentelles über das Sehen im Hellen und Dunkeln". Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. 6, No. 2, 1904.

O. Lummer: „Über Grauglut und Rotglut", Verh. d. Phys. Ges. Berlin 16. 1897.

Trägt man in einem orthogonalen System die Wellenlängen als Abszissen, die zugehörigen Werte der Empfindlichkeit nach den Tabellen 1 bis 7 als Ordinaten ab, so erhält man die Empfindlichkeitskurve für verschiedene Intensitäten (Fig. 1)[1]. Vom Kriesschen Standpunkte aus müssen die Empfindlichkeitskurven für schwache Intensitäten die Stäbchenempfindlichkeit wiedergeben, während die Empfindlichkeit der Zapfen durch die Königsche II-Kurve (Tab. 6) dargestellt wird. Die Zapfen sind also am empfindlichsten für Licht von der Wellenlänge 555 μμ ungefähr, die Stäbchen für Wellenlängen zwischen 495 und 530 μμ.

Da Langley auf das Deutlichwerden kleiner Buchstaben einstellte, mußte er foveal, d. h. mit den Zapfen beobachten. Er erhielt also trotz der geringen Intensität die Kurve, wie sie großen Helligkeiten entspricht, weil die Empfindlichkeitskurve für große Helligkeiten zugleich die Empfindlichkeitskurve der Zapfen ist.

Wir sehen hieraus, daß wir uns vom Purkinjephänomen frei machen können, wenn wir nur mit der Fovea beobachten. Wir erzielen damit zugleich Unabhängigkeit vom Adaptationszustande[2]).

Sowohl bei der Ermittelung der Schwellenwerte[3]) als auch bei der Königschen Methode[4]) der heterochromen Photometrie stellen sich der genauen Bestimmung der Helligkeitsempfindlichkeitskurve erhebliche Schwierigkeiten entgegen. Ein höherer Grad der Genauigkeit wurde erst durch Einführung des Flickerprinzips[5]) ermöglicht. Während aber die bisher konstruierten Flickerphotometer sich nur zum Photometrieren von Mischfarben eignen, setzt uns das Spektral-Flickerphotometer von O. Lummer und E. Pringsheim[6]) in den Stand, die Helligkeitsverteilung im Spektrum zu messen.

Plan der eigenen Untersuchung.

O. Lummer und E. Pringsheim haben in der unten zitierten Veröffentlichung gezeigt, daß das Spektral-Flickerphotometer unter gewissen Bedingungen als optisches Pyrometer benutzt werden könne. Hat man nämlich mittels des Flickerphotometers die Empfindlichkeit des Auges festgestellt, und hat man gezeigt, daß diese Empfindlichkeit konstant ist, so kann man mit dem neuen Apparate die Temperatur leuchtender „schwarzer"

[1]) Zum Vergleiche ist die späterhin erwähnte Stillersche Empfindlichkeitskurve eingetragen.

[2]) J. v. Kries l. c. p. 182, 183.

[3]) J. v. Kries l. c. p. 21.

[4]) J. v. Kries l. c. p. 258.

[5]) O. N. Rood. Am. Journ. of. Sc. 46. p. 173. 1893.
Polimanti: Zeitschr. f. Psych. und Phys. d. Sinnesorg. 19 p. 263.

[6]) O. Lummer u. E. Pringsheim: Jahresbericht der Schles. Ges. für vaterl. Cultur. 1906. Beibl. 1907. S. 466.

Temperaturstrahler bestimmen. Die Untersuchungen über das Spektral-Flickerphotometer und Pyrometer zerfallen also in zwei Teile: In die Ermittelung der Empfindlichkeit des Auges und in die Temperaturbestimmung. Über den ersten Teil sind auf Veranlassung der Herren Lummer und Pringsheim schon Untersuchungen[1]) von Herrn O. Stiller am physikalischen Institute der Universität Breslau angestellt worden. Da im allgemeinen die Empfindlichkeit für verschiedene Beobachter verschieden sein wird, so hat der Verfasser die Messungen von Herrn Stiller wiederholt und zum Teil erweitert.

Im Prinzip wird die Empfindlichkeit folgendermaßen bestimmt. Nachdem das Flickerphotometer justiert und geeicht ist, photometriert man damit das Spektrum des elektrisch geglühten „schwarzen Körpers“[2]) und erhält so die relative Helligkeitsverteilung dieses Spektrums, wie es von dem Prisma des Flickerphotometers entworfen wird. Da die Temperatur des „schwarzen Körpers“ mit dem zugehörigen Thermoelement gemessen werden kann, so ergibt sich aus der Wienschen Gleichung die Intensitätsverteilung für ein normales Spektrum. Ein Hauptfortschritt der Methode gegenüber den älteren besteht in dieser Benützung der genau bekannten Energieverteilung des schwarzen Körpers. Reduziert man die Helligkeitsverteilung auf das Normalspektrum, so wird die Empfindlichkeit für jede Spektralfarbe in willkürlichem Maße gemessen, indem man das Verhältnis des Helligkeitswertes zum Intensitätswert an dieser Stelle bildet.

Statt die Helligkeitsverteilung für das Normalspektrum zu berechnen, könnte man auch die Intensitätsverteilung auf das Prismenspektrum reduzieren.

Hat man die Empfindlichkeit bestimmt, so kann man den umgekehrten Weg einschlagen und die schwarze Temperatur eines leuchtenden Temperaturstrahlers bestimmen. Aus der Wienschen Gleichung, die im sichtbaren Gebiete auch bei relativ hohen Temperaturen die Intensitätsverteilung im Normalspektrum des schwarzen Körpers richtig wiedergibt, ersieht man, daß mit steigender Temperatur die Intensität der violetten Wellen stärker ansteigt als die der roten, d. h. mit steigender Temperatur ändert sich das Intensitätsverhältnis für zwei feste Wellenlängen. Mittels des Flickerphotometers kann man nun zunächst das Helligkeitsverhältnis für die beiden Farben feststellen; da die Empfindlichkeit bekannt ist, so kennt man auch das Intensitätsverhältnis. Aus diesem Intensitätsverhältnis kann man dann die Temperatur berechnen.

Wird außerdem die Temperatur noch auf andere Weise, z. B. mit dem Thermoelement ermittelt, so kann das erhaltene Resultat geprüft werden.

---

[1]) Noch nicht veröffentlicht.

[2]) O. Lummer und F. Kurlbaum. Verh. d. phys. Ges. XVII, 9.

Auf Veranlassung meiner hochverehrten Lehrer, der Herren Professoren Lummer und Pringsheim habe ich diese Untersuchungen in Angriff genommen.

Beschreibung des Apparates[1]).

Das Flickerphotometer besteht aus einem gewöhnlichen Spektralapparat, dessen Kollimatorrohr zwei nebeneinander stehende vertikale Spalte trägt, die zur optischen Achse symmetrisch liegen und von derselben Lichtquelle gleichstark beleuchtet werden. Im Beobachtungsfernrohr entstehen dann zwei Spektren, die sich teilweise überdecken und gleich hell sind. Vor den Kollimatorspalten ist ein um seine horizontale Achse drehbarer Blechzylinder angebracht. Die Achse verläuft parallel zur Spaltebene, so daß der Zylindermantel an den beiden Spalten in ihrer Längsrichtung vorbeirotiert. Der Blechmantel ist so mit Ausschnitten versehen, daß die Spalte abwechselnd mit Licht beschickt werden. Die beiden Spektren werden also jetzt nicht gleichzeitig sondern abwechselnd erzeugt. Die Okularblende ist dementsprechend in beliebig schnellem Wechsel mit Licht von zwei verschiedenen Wellenlängen ausgefüllt.

Die Anordnung des rotierenden Zylinders bringt es mit sich, daß man das Licht nicht direkt von der Lichtquelle zu den Spalten führen kann. Man läßt es parallel zur Zylinderachse auf zwei im Innern des Hohlzylinders befindliche totalreflektierende Prismen und von da auf die Spalte fallen.

Blickt man bei einer beliebigen Fernrohrstellung ins Okular, so sieht man bei sehr langsamer Umdrehung des Zylinders den Okularspalt abwechselnd hintereinander mit zwei verschiedenen Farben ausgefüllt. Bei schneller werdender Rotation kann man die einzelnen Farben nicht mehr unterscheiden, sondern man sieht ein Flickern. Durch Veränderung der Breite des einen der beiden Kollimatorspalte jedoch läßt sich erreichen, daß das Flickern schwächer wird und schließlich ganz verschwindet. Nach dem Flimmerprinzip tritt dies ein, wenn die beiden zu vergleichenden Farben die gleiche Helligkeit besitzen. Nach dem Vierordtschen Prinzip verhalten sich dann die Helligkeiten dieser Farben bei gleichen Spaltbreiten umgekehrt wie die Kollimatorspaltbreiten, bei denen das Flickern verschwindet.

Durch Drehen des Beobachtungsfernrohres kann man bei einem bestimmten Spaltabstande jede Farbe des einen Spektrums mit einer ganz bestimmten des anderen zum Vergleich bringen. Um den Bereich der zu

---

1) S. Seite 11, Anm. 6.

vergleichenden Spektralbezirke zu erweitern, ist dafür gesorgt, daß der Abstand der Spalte, dessen kleinster Wert 2 mm beträgt, auf 4, 6 usw. bis 12 mm vergrößert werden kann. Außerdem sind dem Apparat mehrere Prismen von verschiedener Dispersion beigegeben. Der Raum zwischen den Spalten ist durch Blenden verschlossen. Die Breite der Spalte wird durch Schrauben mit Trommelablesung reguliert. Einer Umdrehung gleich 100 Skalenteilen entspricht eine Spaltbreite von 0,25 mm. Der vom Beobachter aus links liegende Spalt soll in Folgendem mit I, der rechte mit II bezeichnet werden.

Prisma und Beobachtungsfernrohr können so umgelegt werden, daß die von den Spalten I und II ausgehenden Strahlen ihre Rollen genau vertauschen. (Rechts- und Linksstellung.) Diese Vorrichtung gestattet es, das Photometer so einzustellen, daß beide Spalte gleich stark beleuchtet werden. Macht man nämlich beide Spalte gleich breit, so kann man jetzt durch Drehen des Fernrohrs einmal bei Rechts-, das andere Mal bei Linksstellung die beiden Wellenlängen aufsuchen, für die das Flickern verschwindet. Ergeben sich beide Male dieselben Wellenlängenpaare als gleich hell, so ist das Photometer richtig eingestellt. Das zu einer bestimmten Fernrohrstellung gehörige Wellenlängenpaar kann aus Dispersionskurven[1]) entnommen werden.

Die Einstellung des Fernrohrs auf einen bestimmten Wellenlängenbezirk wird durch eine Schraube mit Trommel bewirkt und kann auf einer Skala abgelesen werden. Die Trommel gestattet, hundertstel Skalenteile zu messen. Die Eichung des Instrumentes geschieht folgendermaßen. Beide Kollimatorspalte werden möglichst schmal gemacht und mit homogenem Licht von bekannter Wellenlänge beleuchtet. Der eine Spalt wird zunächst durch einen Sektor des Zylindermantels verdeckt und die vom anderen Spalt entworfene Spektrallinie wird durch Drehen des Fernrohrs in die Mitte des Okularspaltes gebracht. Die zugehörige Fernrohrstellung wird als Abszisse in einem orthogonalen Koordinatensystem abgetragen, die betreffende Wellenlänge als Ordinate. Dasselbe geschieht alsdann für den anderen Spalt. Wird dieses Verfahren noch für genügend viel andere Wellenlängen ausgeführt, so erhält man zwei Dispersionskurven, die um so mehr gegeneinander verschoben sind, je weiter die Kollimatorspalte auseinander liegen. Es genügt, das Photometer für die engste Schaltstellung (2 mm) zu eichen. Für die übrigen Spaltabstände können die Einstellungen berechnet werden, wenn man die Fernrohrstellung z. B. für eine Natriumlinie kennt. Da das Okular kein Fadenkreuz enthält, so geschieht die Einstellung der Spektrallinien auf die Mitte des Spaltes nach Schätzung. Die hierdurch hervorgerufene Ungenauigkeit beträgt ungefähr 2 Trommelteile. Dem entspricht ein möglicher Fehler in der Einstellung

[1]) Diese sind von Herrn O. Stiller bestimmt worden.

der Wellenlänge von ungefähr 0,5 μμ im roten Ende und von 0,1 bis 0,2 μμ im kurzwelligen Ende, entsprechend der größeren Dispersion im Violett.

Bestimmung der Helligkeitsverteilung im Spektrum der Nernstlampe.

Am vorteilhaftesten wäre es gewesen, die Strahlung des elektrisch geglühten „schwarzen Körpers" nach Lummer-Kurlbaum[1]) direkt mit dem Flickerphotometer zu untersuchen. Die Kollimatorlinse des Photometers wurde jedoch nicht von der Strahlung des dem Verfasser zur Verfügung stehenden „schwarzen Körpers" ausgefüllt. Diesem Mangel hätte man durch Einschalten einer Blende abhelfen können. Hauptsächlich Sparsamkeitsgründe — der „schwarze Körper" erfordert Stromstärken von 70 bis 80 Ampère und mehr — führten dazu, einen indirekten Weg einzuschlagen.

Als Lichtquelle wurde eine 220 Volt-Nernstlampe gewählt, deren Strahlung durch eine vorgeschaltete Mattscheibe diffus gemacht wurde. Es wurde also die Helligkeit der Mattscheibe untersucht. Absorptionsmessungen ergaben, daß die Wellenlängen von 460 μμ bis 680 μμ von der Scheibe in demselben Verhältnis geschwächt wurden.

Der Strahlengang von der Nernstlampe bis zur Mattscheibe verlief in einem geschwärzten Hohlraum. Vor der Mattscheibe war eine kreisrunde Blende von 2,5 cm Durchmesser angebracht. Von hier aus fielen die Lichtstrahlen auf die beiden totalreflektierenden Prismen. Die Entfernung der Mattscheibe von diesen Prismen wurde so gewählt, daß die Kollimatorlinse von beiden Spalten völlig und gleichmäßig beleuchtet wurde. Da es nicht gelang, die Scheibe so einzustellen, daß beide Spalte genau gleich viel Licht erhielten, so wurde die Helligkeitsverteilung sowohl bei Rechts- als auch bei Linksstellung gemessen und aus beiden Werten das Mittel genommen.

Um die Strahlung der Nernstlampe möglichst konstant zu halten, wurde diese nicht bei voller Belastung sondern bei 200 Volt gebrannt. Da die Lampe an das städtische Leitungsnetz angeschlossen war und dieses Spannungsschwankungen von 5 Volt und mehr aufwies, so wurde die Spannung an einem guten Voltmeter abgelesen und mittels eines Gleitwiderstandes reguliert. Die jetzt noch auftretenden Änderungen der Stromstärke waren so gering, daß ein Einfluß auf die Strahlung der Lampe nicht mehr nachgewiesen werden konnte.

---

1) O. Lummer und F. Kurlbaum. Verh. d. phys. Ges. XVII, 9.

Der rotierende Zylinder wurde durch einen kleinen Elektromotor betätigt. Da die Empfindlichkeit der Methode auch von der Tourenzahl abhängt, so wurde dieselbe an einem Tachometer von Dr. Th. Horn, Leipzig, abgelesen. In den Tabellen ist unter einer besonderen Rubrik die Tourenzahl pro Minute angegeben, bei der für je ein Wellenlängenpaar das Flickern gerade verschwand. Man sieht, daß für verschiedene Wellenlängenpaare die Umdrehungszahl verschieden ist. Eine bestimmte Abhängigkeit der kritischen Tourenzahl von der Wellenlängendifferenz der verglichenen Farbenpaare konnte nicht nachgewiesen werden. Es zeigte sich, daß sie am höchsten war für Farbenpaare, die dem hellsten Teile des Spektrums und dem roten Ende angehören. Hingegen mußte im violetten Ende immer eine bedeutend niedrigere Tourenzahl gewählt werden. Außerdem zeigte sich, daß sie für ein bestimmtes Wellenlängenpaar unter verschiedenen Bedingungen, z. B. zu verschiedenen Zeiten, verschieden war; allerdings waren diese Unterschiede bei weitem nicht von der Größenordnung wie die oben erwähnten.

Die Ausführung der Messungen gestaltete sich nun folgendermaßen. Zunächst wurden die beiden Kollimatorspalte gleich breit gemacht und das Fernrohr wurde nun auf das Wellenlängenpaar eingestellt, für das das Flickern verschwand. Die Helligkeit der so ermittelten gleich hellen Wellenlängen wurde als Einheit gewählt. Die Resultate sind in den Tabellen 8 (für 2 mm Spaltabstand) und 8a (für 6 mm Spaltabstand) wiedergegeben. Um eine etwa vorhandene Ungenauigkeit in der Nullstellung der Spalte möglichst zu eliminieren, wurde jede Messung bei zwei Spaltbreiten ausgeführt. Es sind immer die Mittel aus je fünf Einzeleinstellungen angegeben. Der mittlere Einstellungsfehler ist in $\mu\mu$ eingetragen.

Tabelle 8.

Rechtsstellung.

Spaltbreite in Skalenteilen I	II	Einstellung des Beobachtungsfernrohrs		Gleichhelle Wellenlängen in $\mu\mu$	Mittlerer Fehler in $\mu\mu$ ausgedrückt	Tourenzahl in der Minute
10	10	36,88	36,76	$\lambda_I = 608$	$\Delta\lambda_I = 1{,}0$ $\Delta\lambda_{II} = 0{,}7$	264
25	25	36,65		$\lambda_{II} = 568$	$\Delta\lambda_I = 1{,}7$ $\Delta\lambda_{II} = 1{,}5$	275

Linksstellung.

Spaltbreite I	Spaltbreite II	Fernrohr		Gleichhelle Wellenlängen	Mittlerer Fehler in μμ	Tourenzahl
10	10	21,81	21,88	$\lambda_I = 569$	$\Delta\lambda_I = 0{,}5$ $\Delta\lambda_{II} = 0{,}5$	296
25	25	21,95		$\lambda_{II} = 612$	$\Delta\lambda_I = 0{,}6$ $\Delta\lambda_{II} = 0{,}5$	340

Tabelle 8a (bei 6 mm Spaltabstand).

Rechtsstellung.

Spaltbreite I	Spaltbreite II	Fernrohr		Wellenlänge	Tourenzahl
10	10	36,53	36,47	$\lambda_I = 634$	290
50	50	36,42		$\lambda_{II} = 542$	364

Linksstellung.

Spaltbreite I	Spaltbreite II	Fernrohr		Wellenlänge	Tourenzahl
10	10	22,46	22,50	$\lambda_I = 539$	282
50	50	22,54		$\lambda_{II} = 631$	329

Der Einstellungsfehler betrug hier höchstens 1 μμ.

Schon während der Vorarbeiten wurden zum Vergleiche Einstellungen auf gleiche Helligkeit auch ohne Flickern gemacht. Der rotierende Zylinder wurde dabei so in Ruhestellung gebracht, daß der Okularspalt zur Hälfte mit der einen, zur Hälfte mit der andern Farbe ausgefüllt war. In der ersten Zeit wurden noch ziemlich große Unterschiede konstatiert. Die Übung brachte es aber bald mit sich, daß die Einstellungen mit und ohne Flickern annähernd gleiche Resultate ergaben. In einigen Tabellen sind die Einstellungen auf gleiche Helligkeit ohne Flickern angegeben. So gehören z. B. zu Tabelle 8 folgende Einstellungen:

	Fernrohr	λ_I	λ_{II}
Rechtsstellung . . .	36,94	612	571
Linksstellung . . .	21,85	570	614

Die Werte für diese Angaben wurden durchweg nur mit einer einzigen Einstellung gewonnen, können also keinen Anspruch auf Genauigkeit erheben.

Von diesen beiden so als gleich hell ermittelten Wellenlängen wurde nun im Spektrum nach beiden Seiten etappenweise vorgegangen. Aus der Dispersionskurve wurde abgelesen, wie das Fernrohr eingestellt werden mußte, damit z. B. die Farbe, die vorher in Spalt II war, nach Spalt I kam. Die Dispersionskurve ergab dann zugleich die neue Wellenlänge in Spalt II. Nachdem diese Farben photometriert waren, wurde dasselbe Verfahren wiederholt usw., bis das ganze Spektrum durchlaufen war. Da bei diesen Einstellungen die Fernrohrstellung für jedes Wellenpaar beibehalten werden mußte, so wurde das Flickern jetzt durch Verändern der Kollimatorspaltbreite zum Verschwinden gebracht. Es erwies sich als vorteilhaft, die Intensität der helleren Farbe zu variieren. Zur helleren Wellenlänge gehört der schmälere Spalt, und bei diesem macht eine Verkleinerung der Breite, z. B. um einen Trommelteil, mehr aus als beim breiteren Spalt. Der Übergang vom Flickern zum gleichmäßigen Lichteindruck ist also beim Verändern des schmäleren Spaltes schärfer.

Die Messungen sind in den Tabellen 9 (2 mm) und 9a (6 mm) wiedergegeben. In der ersten Spalte findet man die Mikrometereinstellung des Fernrohres, in der zweiten und dritten die aus den Dispersionskurven ermittelten zugehörigen Wellenlängen. Die Werte für den veränderlichen Spalt sind die Mittel aus je fünf Einstellungen. Für jedes Wellenlängenpaar sind die zugehörigen Spaltbreiten I und II in Skalenteilen angegeben, ferner das Verhältnis I/II oder II/I, das nach dem Vierordtschen Prinzip das Helligkeitsverhältnis darstellt. Der mittlere Fehler ist in Prozenten dieses Verhältnisses angegeben. Der festgehaltene Spalt ist daran kenntlich, daß keine Dezimalen angegeben sind.

Die Sterne in der Rubrik „Bemerkungen“ deuten auf besondere Einstellungsschwierigkeiten.

Tabelle 9. Rechtsstellung.

Fernrohr	λ_1	λ_2	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I Fehler in %	I/II oder II/I	I/II oder II/I Mittel	Touren-zahl pro min.	Veränderl. Spalt ohne Flickern	Bemerkungen
38,95	662	608	35	6,9	1,7	0,197	0,189	258	6,5	leicht
			70	12,6	2,2	0,180		275		
36,76	608	568	10	9,7	3,5	0,970	1,000*)	282	12,0	ungenau*)
			25	25,1	6,6	1,004		275		
34,50	568	535	12,8	25	1,6	0,512	0,510	252	12,0	leicht
			20,3	40	1,6	0,508		240		
32,50	535	508	5,2	15	1,9	0,341	0,340	188	5,5	leicht
			10,2	30	3,9	0,340		189		
30,00	508	485	7,2	30	1,7	0,240	0,227	167	8,0	zl. schwer**)
			12,9	60	2,5	0,215		170		
27,70	485	467	16,1	50	4,7	0,322	0,316	154	15,0	schwer
			22,6	75	2,3	0,301		150		
25,40	467	451	16,6	50	8,9	0,332	0,327	125	16,0	schwer ***)
			24,1	75	5,6	0,321		128		
23,15	451	437	23,0	75	3,6	0,307	0,308	107	27,0	schwer
			62,0	200	5,0	0,310		111		
40,15	700	635	150	5,0	0,0	0,030	0,030	250	5,0	leicht. Sehr breite Spalte
			200	6,1	2,6	0,030		250		
37,90	635	588	20	9,9	1,2	0,495	0,482	248	11,0	leicht
			30	14,1	1,3	0,470		297		Ergänzungs-
35,70	588	551	10,8	15	1,5	0,720	0,713	303	11,0	leicht
			21,2	30	1,0	0,707		300		messungen
33,40	551	521	9,1	20	0,9	0,455	0,435	267	9,0	leicht
			16,6	40	1,6	0,415		255		
31,10	521	496	9,3	40	2,8	0,232	0,224	253	10,0	zl. schwer**)
			13,0	60	1,5	0,217		255		

Tabelle 9. Linksstellung.

Fernrohr	λ_2	λ_1	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I Fehler in %	I/II oder II/I	Mittel	Touren-zahl pro min.	Veränderl. Spalt ohne Flickern	Bemerkungen
19,55	672	612	6,8 8,3	50 65	0,6 2,2	0,136 0,128	0,132	257 281	7,5	leicht
21,88	612	569	10 25	9,9 25,8	0,8 1,0	0,990 1,032	1,000*)	298 335	8,5	ungenau*)
24,20	569	534	25 40	12,0 18,9	1,5 0,9	0,480 0,472	0,476	285 302	10,5	leicht
26,60	534	506	30 50	7,9 13,0	1,8 0,9	0,263 0,260	0,262	291 325	8,0	leicht
29,00	506	482	50 75	9,8 14,4	3,3 1,9	0,196 0,192	0,194	247 238	8 2	zl. schwer**)
31,45	482	462	50 75	13,6 18,9	5,3 5,0	0,272 0,252	0,262	201 205	16,0	
33,95	462	447	75 100	20,8 25,4	4,0 5,0	0,277 0,254	0,266	160 117	20,0	schwer***)
36,35	447	435	100 150	22,1 32,8	5,8 4,1	0,221 0,119	0,220	96 94	20,0	
18,35	710	640	4,5	200	5,0	0,023	0,023	220	5,0	leicht. Breiter Spalt
20,65	640	590	8,8 13,1	20 30	1,8 1,7	0,440 0,437	0,438	287 306	9,5	zl. leicht
23,00	590	551	13,1 19,7	20 30	1,5 2,7	0,652 0,657	0,654	267 266	13,0	leicht
25,40	551	520	7,7 11,2	20 30	2,3 3,0	0,357 0,373	0,365	254 258	8,5	leicht
27,77	520	494	6,0 10,2	30 50	2,0 3,5	0,200 0,204	0,202	249 257	5,8	zl. schwer*)

Ergänzungsmessungen

Tabelle 9a.

Rechtsstellung.

Fernrohr	λ_1	λ_2	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I Fehler in %	I/II oder II/I	I/II oder II/I Mittel	Touren-zahl	Veränderl. Spalt ohne Flickern	Bemerkungen
36,47	634	542	9,9	10	0,8	0,994	1,000*)	306	8	ungenau*)
			53,0	50	2,3	1,060		349		
31,35	542	485	5,1	100	3,9	0,051	0,050	256	6	zl. schwer } **)
			7,4	150	4,1	0,049		266		ungenau }
26,10	485	446	8,8	100	1,6	0,088	0,082	123	7	schwer***)
			11,4	150	3,9	0,076		122		

Linksstellung.

Fernrohr	λ_2	λ_1	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I Fehler in %	I/II oder II/I	I/II oder II/I Mittel	Touren-zahl	Veränderl. Spalt ohne Flickern	Bemerkungen
22,49	631	539	10	8,7	4,1	0,870	1,000*)	293	9,5	ungenau*)
			25	25,7	3,7	1,028		304		
27,75	539	482	100	5,0	0,0	0,050	0,049	230	5	zl. schwer } **)
			150	7,1	2,0	0,047		229		ungenau }
33,05	482	443	150	10,9	6,2	0,073	0,071	129	12	schwer
			200	13,9	4,6	0,070		122		

Bei *) wird man finden, daß der Mittelwert von III oder III nicht gleich 1 ist, während dieser Wert sich aus den Tabellen 8 und 8a ergibt. Es wurde trotzdem 1 als Mittelwert angenommen, weil dieser Wert zuverlässiger ist. Es zeigte sich nämlich, daß gerade die beiden gleichhellen Farben sich schlecht nach der Methode der Spaltverbreiterung photometrieren ließen. Der Übergang vom Flickern zu gleichmäßiger Helligkeit konnte nicht scharf gemacht werden. Eine mir zusagende Erklärung habe ich nicht finden können.

In der Nähe von 500 μμ verschwand das Flickern für die Mitte und für die Enden des Okularspaltes nicht gleichzeitig. Fixierte man ein Ende, so verschwand das Flickern an dieser Stelle fast völlig, dafür trat es in der Mitte wieder deutlich auf. Hieraus muß man schließen, daß an dieser Erscheinung nicht eine ungleiche Intensitätsverteilung im Okularspalt schuld war, sondern daß die verglichenen Farben für das Zentrum der Fovea einen anderen relativen Helligkeitswert haben als für den Rand, d. h. in dieser Spektralgegend tritt bei der gewählten Spalthöhe das Purkinjephänomen noch störend auf[1]). Das Übel hätte durch Verkleinerung der Okularspalthöhe beseitigt werden können; aber da sich die Erscheinung nur an dieser einzigen Stelle zeigte, so wurde die Spalthöhe beibehalten. Bei niedrigerem Spalte wäre insbesondere für die Beobachtungen im violetten Ende das Gesichtsfeld zu klein geworden. Übrigens ist die Erscheinung bei einem Spaltabstand von 2 mm (Tab. 9) noch recht wenig auffallend. Bei einem Spaltabstande von 6 mm (Tab. 9a), wo die Abweichung sehr deutlich war, wurde möglichst auf Verschwinden des Flickerns in der Mitte des Spaltes eingestellt.

Im kurzwelligen Teile des Spektrums wurden die Messungen durch das Auftreten von Fluoreszenzerscheinungen im Auge erschwert; sie sind durch drei Sterne ***) bezeichnet.

Ferner sei noch erwähnt, daß bei 6 mm Spaltabstand das Auge vor dem Okular recht ruhig gehalten werden mußte. Infolge der großen Verschiedenheit der zu vergleichenden Farben und infolge der chromatischen Abweichung des Auges war eine ziemlich starke Parallaxe vorhanden.

Um noch mehr Punkte der Helligkeitskurve zu finden und vor allem, um die Lage des Helligkeitsmaximums festzustellen, wurde aus den schon gefundenen Werten der Helligkeit dieselbe für eine neue Wellenlänge rechnerisch interpoliert. Diese Wellenlänge wurde dann wieder mit den benachbarten, aus den Dispersionskurven ablesbaren Wellenlängen photometriert. Diese Ergänzungsmessungen sind in Tabelle 9 kenntlich gemacht.

---

[1]) In den Tabellen sind diese Punkte durch **) bezeichnet.

Die daraus sich ergebende Helligkeitsverteilung ist in Tabelle 10 wiedergegeben und in Figur 2 graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die

Tabelle 10.

Helligkeitsverteilung im Spektrum der Nernstlampe (200 Volt).

Rechtsstellung		Linksstellung.	
λ	Logarithm. der Helligkeit.	λ	Logarithm. der Helligkeit.
662	3,277	672	3,121
608	4,000	612	4,000
568	4,000[1])	569	4,000
535	3,708	534	3,678
508	3,239	506	3,096
485	2,595	482	2,384
467	2,095	462	1,802
451	1,609	447	1,227
437	1,098	435	0,569
588	4,039[2])	590	4,055[2])
700	2,199	710	2,058
635	3,722	640	3,696
551	3,892	551	3,870
521	3,530	520	3,432
496	2,880	494	2,738

Wellenlängen, als Ordinaten die Logarithmen der zugehörigen Helligkeitswerte abgetragen. Aus den Rechts- und Linkskurven mußte nun die Mittelwertkurve bestimmt werden. Zu dem Zweck wurde Figur 2 in vergrößertem Maßstabe unter genauer Eintragung der Werte hergestellt, für die Wellenlängen 440, 460, 480 . . . . 700 μμ daraus die Helligkeitswerte abgelesen und für jede dieser Wellenlängen das Mittel gebildet. Die so erhaltene Mittelwertkurve wurde alsdann auf das Normalspektrum reduziert. Dazu wurden die von O. Stiller empirisch ermittelten Dispersionskurven benützt. Bezeichnet man die auf der Fernrohrskala abgelesene Einstellung des Beobachtungsfernrohrs mit n (in den Dispersionskurven als Abszissen abgetragen), so ist die reduzierte Helligkeit H_r dem gefundenen Helligkeitswerte H direkt und dem Anstieg der Dispersions-

[1]) Die Helligkeit der beiden Farben ist nicht gleich 1, sondern gleich 10 000 gesetzt, um negative Ordinaten zu vermeiden.

[2]) Interpoliert.

kurve $\frac{d\lambda}{dn}$ umgekehrt proportional. Da es sich um relative Helligkeiten handelt, kann der Proportionalitätsfaktor gleich 1 gesetzt werden.

$$H_r = H \cdot \frac{dn}{d\lambda} = H \cdot R.$$

Der Reduktionsfaktor $R = \frac{dn}{d\lambda}$ wurde folgendermaßen bestimmt. Es seien λ_1 und λ_2 ($\lambda_2 > \lambda_1$) zwei Wellenlängen mit den zugehörigen Fernrohreinstellungen n_1 und n_2; dann ist angenähert

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

für die Wellenlänge $\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$, wenn $\lambda_2 - \lambda_1$ nicht zu groß gewählt wird. Auf diese Weise wurde der Reduktionsfaktor graphisch aus den Dispersionskurven ermittelt, indem $\lambda_2 - \lambda_1$ gleich 10 μμ gewählt wurde.

Aus der obigen Formel ergibt sich

$$\log H_r = \log H + \log R.$$

Nach dieser Formel wurde die reduzierte Helligkeitsverteilung bestimmt, wie sie in Tab. 11 und in Fig. 2 wiedergegeben ist.

Tabelle 11.

Helligkeitsverteilung im Normalspektrum.

λ	log H_r	λ	log Hr
440	1,689	600	4,034
60	2,250	20	3,867
80	2,747	40	3,566
500	3,243	60	3,182
20	3,689	80	2,668
40	3,925	700	2,042
60	4,049		
80	4,083		

Bei großem Spaltabstande (6 mm) konnten nur je 4 Punkte der Rechts- und Linkskurve bestimmt werden. Eine Mittelwertkurve konnte also nicht gebildet werden, da die einzelnen Kurven nicht festgelegt werden konnten. Es sind deshalb die Werte einzeln reduziert worden und zum Vergleich in Fig. 2 eingetragen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung. In Tabelle 12 finden sich die zugehörigen Werte von log H_r, die, bevor sie in die Figur eingetragen wurden, sämtlich um 0,250 verkleinert wurden. Diese Operation bedeutet nichts weiter, als die Wahl einer neuen Einheit für die Helligkeit.

Tabelle 12.

Rechtsstellung.			Linksstellung.		
λ	log H	log H_r	λ	log H	log H_r
634	4,000	3,910	631	4,000	3,910
542	4,000	4,150	539	4,000	4,160
485	2,699	3,039	482	2,690	3,040
446	1,613	2,163	443	1,542	2,112

Bestimmung der Empfindlichkeit.

Zunächst mußte die Verteilung der Intensität im Spektrum der Nernstlampe festgestellt werden. Zu diesem Zweck wurde die Strahlung der Mattscheibe mit der Strahlung des „schwarzen Körpers" mittels des Spektralphotometers von König-Martens[1]) verglichen und zwar bei zwei Temperaturen des „schwarzen Körpers".

Für das sichtbare Gebiet kann man die Intensitätsverteilung im Normalspektrum des schwarzen Körpers bei der Temperatur T aus der Wienschen Gleichung

$$1. \quad S\lambda = c_1 \, \lambda^{-5} \, e^{\frac{-c_2}{\lambda T}}$$

berechnen. Die Konstante c_1 hängt von der Versuchsanordnung ab. Da diese während der Messungen nicht verändert wurde und da es sich nur um Intensitätsverhältnisse handelte, so konnte

$$c_1 = 1$$

gesetzt werden. c_2 hat nach den Versuchen von Lummer-Pringsheim[2]) den Wert 14 600. Hierbei muß λ in μ, T absolut gemessen werden.

Die Einrichtung des Spektralphotometers von König-Martens wird als bekannt vorausgesetzt. Das eine Feld erhielt Licht vom schwarzen Körper (Intensität Sλ), das andere von der Mattscheibe (Jλ). Der Winkel, um den der Nicol gedreht werden mußte, um beide Felder gleich hell zu machen, sei mit α bezeichnet, dann besteht die Beziehung

$$J\lambda = \frac{S\lambda}{tg^2 \, \alpha}{}^{3}).$$

Die so ermittelte Intensitätsverteilung ist in den Tabellen 13a und 13b verzeichnet. Mit Hilfe der sogenannten Gauß'schen Logarithmen wurde aus den a- und b-Werten von Jλ für jede Wellenlänge der Logarithmus des Mittels aufgesucht. Die Mittelwertlogarithmen wurden noch um 9,969 vergrößert, damit für die Wellenlänge 600 die Intensität gleich der

---

1) F. F. Martens u. F. Grünbaum. Ann. 12. 1903.
2) O. Lummer u. E. Pringsheim. Verh. d. Phys. Ges. 1901 p. 42.
3) F. F. Martens und F. Grünbaum, l. c.

Tabelle 13a.

Temperatur des schwarzen Körpers T = 1478° abs.

Spannung an den Klemmen 10,37 Volt.

Stromstärke 73,95 Ampère.

λ	log Sλ	2 log tg α	log Jλ
440	0,033—8	0,883—2	0,150—7
60	0,360—8	0,021—1	0,339—7
80	0,656—8	0,186—1	0,470—7
500	0,925—8	0,337—1	0,588—7
20	0,169—7	0,451—1	0,719—7
40	0,394—7	0,561—1	0,833—7
60	0,598—7	0,689—1	0,909—7
80	0,786—7	0,789—1	0,998—7
600	0,959—7	0,860—1	0,099—6
20	0,119—6	0,964—1	0,154—6
40	0,266—6	0,043	0,223—6
60	0,402—6	0,103	0,299—6
80	0,528—6	0,128	0,400—6

Tabelle 13b.

Temperatur des schwarzen Körpers 1679° abs.

Spannung 13,26 Volt. Stromstärke 84,40 Ampère.

λ	log Sλ	2 log tg α	log Jλ
440	0,199—7	0,348	0,852—8
60	0,477—7	0,371	0,105—7
80	0,726—7	0,429	0,297—7
500	0,952—7	0,513	0,440—7
20	0,158—6	0,567	0,590—7
40	0,345—6	0,624	0,721—7
60	0,515—6	0,677	0,839—7
80	0,672—6	0,753	0,919—7
600	0,815—6	0,787	0,028—6
20	0,947—6	0,840	0,106—6
40	0,068—5	0,896	0,172—6
60	0,180—5	0,963	0,217—6
80	0,283—5	0,966	0,318—6

Helligkeit wurde. Diese Mittelwerte findet man in Tabelle 14, Kolonne 1 und 2.

Tabelle 14.

$J\lambda$ = Intensität, $H\lambda$ = Helligkeit, $E\lambda$ = Empfindlichkeit.

λ	1. log $J\lambda$	2. log $J\lambda$ + 9,969	3. log $H\lambda$	4. log $E\lambda$	5. $E\lambda$	6. $E\lambda$
440	0,026—7	2,995	1,689	0,694—2	4,9	3,1
60	0,238—7	3,207	2,250	0,043—1	10,1	6,9
80	0,392—7	3,361	2,747	0,386—1	24,3	15,1
500	0,520—7	3,489	3,243	0,754—1	56,8	35,3
20	0,660—7	3,629	3,689	0,060	114,8	71,5
40	0,780—7	3,749	3,925	0,176	150,0	93,3
60	0,874—7	3,843	4,049	0,206	160,7	100,0
80	0,960—7	3,929	4,083	0,154	142,6	88,7
600	0,065—6	4,034	4,034	0,000	100,0	62,2
20	0,131—6	4,100	3,867	0,763—1	57,9	36,3
40	0,198—6	4,167	3,566	0,399—1	25,1	15,6
60	0,254—6	4,223	3,182	0,959—2	9,1	5,7
80	0,361—6	4,330	2,668	0,338—2	2,2	1,4

Ein Maß für die relative Helligkeitsempfindlichkeit des Auges erhält man nun, wenn man für die verschiedenen Farben das Verhältnis der Helligkeit und der zugehörigen Intensität bildet. In Tabelle 14 sind die gefundenen Werte der Empfindlichkeit in Kolonne 4 und 5 wiedergegeben. In Kolonne 6 ist die Stelle größter Empfindlichkeit gleich 100 gesetzt.

In Figur 3 sind die Werte aus Kolonne 2, 3 und 4 eingetragen. In Figur 4 ist die Empfindlichkeit selbst (Kolonne 6) als Funktion der Wellenlänge eingezeichnet. Mit Erlaubnis des Herrn O. Stiller bringe ich in Figur 4 zum Vergleich die für ihn gültige Empfindlichkeitskurve[4]).

Benützt man die bei einem Spaltabstande von 6 mm gefundenen Resultate (Tab. 12), so erhält man Tabelle 15. Die Bezeichnungen haben dieselbe Bedeutung wie in Tabelle 14.

Die Werte der Kolonne 2 sind aus der Intensitätskurve graphisch interpoliert, die Werte der Kolonne 3 zwecks Anpassung an die erste Empfindlichkeitskurve um 2,773 erhöht. Eine Mittelwertkurve konnte wegen der geringen Anzahl der Punkte nicht aufgestellt werden. Man sieht aber aus Figur 3, daß der Mittelwert recht gut mit der ersten Empfindlichkeitskurve zusammenfällt.

4) Meine Messungen sind nach den Stillerschen ausgeführt worden.

Tabelle 15.

λ	1. $\log H_\lambda$	2. $\log J_\lambda$	3. $\log E_\lambda$	4. $\log E_\lambda - 2{,}773$	
634	3,910	4,140	0,770—1	2,543	Rechtsstellung
542	4,150	3,743	0,407	3,180	
485	3,039	3,400	0,639—1	2,412	
446	2,163	3,060	0,103—1	1,876	
λ	$\log H_\lambda$	$\log J_\lambda$	$\log E_\lambda$	$\log E_\lambda + 2{,}773$	
631	3,910	4,130	0,780—1	2,553	Linksstellung
539	4,160	3,727	0,433	3,206	
482	3,040	3,380	0,660—1	2,433	
443	2,112	3,030	0,882—2	1,655	

Die Figuren 1 und 4 zeigen nach dem in der Einleitung Gesagten, daß die Kurven der Figur 4 die Helligkeitsempfindlichkeit der Zapfen darstellen, d. h. daß bei der hier angewandten Beobachtungsmethode hauptsächlich die Zapfen in Funktion treten, wie wegen der Anwendung kleiner Felder zu erwarten war. Wie schon in der Einleitung erwähnt ist, können wir infolgedessen bei unserer Versuchsanordnung sicher sein, daß das Purkinjephänomen unsere Resultate nicht fälschend beeinflussen wird, wenn wir uns jetzt an die optische Bestimmung hoher Temperaturen machen.

Das Spektralflickerphotometer als optisches Pyrometer[1].

Bildet man aus der Wienschen Gleichung

$$1) \quad S_\lambda = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

das Verhältnis der Intensitäten für zwei Wellenlängen bei derselben Temperatur, so ergibt sich

$$2) \quad \frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 e^{\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}$$

und durch Logarithmieren

$$3) \quad \log \frac{S_1}{S_2} = 5 \log \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \left[\frac{c_2 \log e}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right]$$

Gleichung 3) gestattet uns, T zu berechnen, wenn wir $\frac{S_1}{S_2}$ kennen. Nun

[1] O. Lummer und F. Pringsheim l. c. p. 5.

Tabelle 16. Linksstellung.

Fernrohr	λ_1	λ_2	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I Fehler in %	I/II oder II/I	Mittel	Tourenzahl	Bemerkungen
19,90	605	661	6,6	35	3,0	0,189	0,179	247	
			8,5	50	2,3	0,170		262	
22,23	563	605	9,4	10	3,9	0,940	1,000*)	265	
			25,9	25	0,6	1,036		283	zl. leicht
24,60	529	563	12,8	25	2,2	0,512	0,510	230	
			20 3	40	2,0	0,508		208	
27,00	502	529	8,1	30	1,2	0,270	0,271	213	
			13,6	50	3,0	0,272		215	
29,35	479	502	12,1	50	3,0	0,242	0,235	180	anstrengend**)
			17,1	75	4,0	0,228		148	ungenau
31,80	460	479	15,5	50	6,6	0,310	0,302	113	Wegen der Fluoreszens sehr unsichere Einstellung
			22,1	75	0,5	0,295		84	
					Rechtsstellung.				
39,15	668	613	35	6,1	1,3	0,174	0,165	285	
			70	10,9	1,7	0,156		290	zl. leicht
36,97	613	572	10	10,0	2,0	1,000	1,000	293	
			25	25,0	0 0	1,000		300	
34,75	572	538	12,2	25	0,4	0,488	0,480	270	
			18,9	40	0,6	0,472		275	leicht
32,45	538	510	7,6	25	5,2	0,304	0,291	260	
			11,1	40	0,5	0,278		235	
30,15	510	487	6,3	30	1,0	0,210	0,198	220	zl. leicht
			11,1	60	1,0	0,185		220	
27,90	487	469	14,4	50	4,2	0 288	0,280	138	schwer
			20,4	75	4,6	0,272		126	

setzt uns das Flickerphotometer in den Stand, das Verhältnis der Helligkeiten zweier Spektralbezirke zu bestimmen. Ist die Empfindlichkeitskurve des Beobachters bekannt, so ist damit auch das Verhältnis der Intensitäten gegeben.

Nach dieser in kurzem Umriß angegebenen Methode wurde die Temperatur des „schwarzen Körpers" bestimmt. Da gleichzeitig die Temratur mit dem Thermoelement gemessen wurde, konnte das Resultat auf seine Richtigkeit geprüft werden.

Da der „schwarze Körper" nicht direkt photometriert werden konnte, so wurde wieder das alte Verfahren eingeschlagen. Bei diesen Messungen wurde eine neue Nernstlampe bei 200 Volt und die alte bei 180 Volt benutzt, so daß bei verschiedenen Helligkeiten gemessen wurde.

Zunächst wurde die Helligkeitsverteilung im Spektrum der Nernstlampe (200 Volt) mit dem Flickerphotometer gemessen (Tab. 16). Mittels der bekannten Empfindlichkeitskurve ergab sich die Intensitätskurve (Tab. 17). Durch Photometrieren der Nernstlampe und des „schwarzen Körpers" mittels des Martens-Königschen Photometers wurde die Intensitätsverteilung in der Strahlung des schwarzen Körpers bestimmt und zwar

Tabelle 17.

λ	$\log H_\lambda$ Linksstellung	$\log H_\lambda$ Rechtsstellung	$\log H_\lambda$ Mittel	Logarith. d. Redukt. Fakt.	$\log H_\lambda$ reduziert.	$\log E_\lambda$	$\log J_\lambda$
660	3,265	3,380	3,326	—0,154	3,172	0,959—2	4,213
40	3,603	3,721	3,666	—0,114	3,552	0,399—1	4,153
20	3,873	3,950	3,913	—0,058	3,855	0,763—1	4,092
600	4,020	4,043	4,032	0,000	4,032	0,000	4,032
580	4,047	4,028	4,038	0,046	4,084	0,154	3,930
60	3,985	3,921	3,954	0,101	4,055	0,206	3,849
40	3,847	3,700	3,780	0,156	3,936	0,176	3,760
20	3,555	3,385	3,478	0,222	3,700	0,060	3,640
500	3,080	2,855	2,982	0,282	3,264	0,754—1	3,510
480	2,535	2,285	2,428	0,352	2,780	0,386—1	3,394
60	1,992	1,730	1,880	0,438	2,318	0,043—1	3,275

bei zwei Temperaturen (Tab. 18 und 19). Die berechneten Temperaturen ergaben sich (Tab. 20 und 21) zu 1496° und 1723°, während mit dem Thermoelement 1477° und 1698° abs. gemessen wurden, d. h. die auf photometrischem Wege ermittelte Temperatur war um 1,3 bezw. 1,5 % zu hoch.

Der Wert 1,992 in der letzten Reihe, Kolonne 1, ist unsicher, siehe Tab. 16. 460 μμ wurde deshalb nicht zur Temperaturbestimmung benützt. J_λ ist die Intensität der Strahlung der Mattscheibe, bezw. der Nernstlampe. Daraus ergibt sich für die zur Temperaturberechnung benützten Wellenlängen die Strahlung S_λ des schwarzen Körpers:

Tabelle 18.

Nernstlampe und schwarzer Körper mittels des Photometers von Martens-König verglichen. Temperatur des schwarzen Körpers 1477°, mit dem Thermoelement gemessen.

λ	log J_λ Tab. 17	2 log tg α	log S_λ
660	4,213	0,131	4,344
500	3,510	0,371—1	2,881
480	3,394	0,244—1	2,638

Tabelle 19.

Dasselbe bei 1698°.

λ	log J_λ	2 log tg α	log S_λ
660	4,213	0,651	4,864
500	3,510	0,151	3,661
480	3,394	0,094	3,488

Tabelle 20.

Berechnung der absoluten Temperatur des schwarzen Körpers aus dem Intensitätsverhältnis zweier Farben (Tab. 18).

Vergleichswellenlgn.	Temperatur optisch gemessen	Temperatur mit d. Thermoelement	Abweichung	Abweichung in %
660/480	1502°	1477°	+ 25°	1,7 %
660/500	1489°		+ 12°	0 8 %
Mittel	1496°	1477°	+ 19°	1,3 %

Tabelle 21.

Dasselbe nach Tabelle 19.

Vergleichs-wellenlgn.	Temperatur optisch	Temperatur thermoel.	Abweichung	Abweichung in %
660/480	1742°	1698°	+ 44°	2,6 %
660/500	1703°		+ 5°	0,3 %
	1723°	1698°	+ 25°	1,5 %

Dieselben Messungen wurden auch noch bei einem Abstand der Kollimatorspalte von 6 mm ausgeführt (Tabellen 22—28). Die berechnete Temperatur des schwarzen Körpers ergab sich zu 1466° und 1691°, also um 0,8 % und 0,5 % zu niedrig.

Tabelle 23.

Berechnung der Intensität im Normalspektrum der Nernstlampe.

λ	log H_λ Rechtsst.	log H_λ Linksst.	log H_λ Mittel	log R Red. Fakt.	log H_λ reduz.	log E_λ	log J_λ
660	4,000	4,000	4,000	— 0,154	3,846	0,959—2	4,887
500	3,650	3,444	3,559	+ 0,282	3,841	0,754—1	4,087 [1]
480	3,120	2,950	3,043	— 0,352	3,395	0,386—1	4,009
460	2,360	2,540	2,459	+ 0,438	2,897	0,043—1	3,854

Tabelle 24.

Messung der Intensität im Normalspektrum des schwarzen Körpers bei 1477° und 1698° absolut.

λ	log J_λ	2 log tg α bei 1477°	2 log tg α 1698°	log S_λ 1477°	log S_λ 1698°
660	4,887	0,131	0,651	5,018	5,538
500	4,087	0,371—1	0,151	3,458	4,231 [3]
480	4,009	0,244—1	0,094	3,253	4,103
460	3,854	[2]	0,994—1	—	3,848

[1] Unsicherer Wert, siehe Tab. 22, Anm. 1.

[2] Wurde nicht gemessen.

[3] Unsicher, siehe Tab. 22, Anm. 1.

Tabelle 22.

Rechtsstellung.

Fernrohr	λ_1	λ_2	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I Fehler in %	I/II oder II/I	Mittel	Tourenzahl	Bemerkungen
37,40	660	556	40	11,8	3,4	3,390	3,513	313	leicht
			60	16,5	2,7	3,636		306	
32,30	556	494	160	5,9	1,7	0,059	0,058	207	unsicher[1])
			150	8,5	6,0	0,057		258	
27,05	494	452	100	6,8	5,3	0,068	0,063	173	schwer
			150	8,8	5,1	0,058		133	

Linksstellung.

21,35	660	555	9,0	40	1,4	4,444	4,681	300	leicht
			12,2	60	0,4	4,918		305	
26,55	555	493	6,6	100	5,5	0,066	0,063	267	unsicher[1])
			9,1	150	4,4	0,061		300	
31,85	493	450	6,3	100	3,2	0,063	0,060	175	schwer
			8,6	150	1,2	0,058		170	

[1]) Das Flickern verschwindet nicht für Rand und Mitte zugleich.

Tabelle 25.

Vergleichs-wellenlgn.	Temperatur optisch	Temperatur thermoel.	Abweichung	
660/500	1421°	1477°	— 56°	3,8 %
660/480	1466°		— 11°	0,8 %
660/460	—		—	—
	1444°		— 33°	2,2 %

Tabelle 26.

Vergleichs-wellenlgn.	Temperatur optisch	Temperatur thermoel.	Abweichung	
660/500	1616°	1698°	— 82°	4,9 %
660/480	1693°		— 5°	0,3 %
660/460	1689°		— 9°	0,6 %
	1666°		— 32°	2,0 %

In diesen beiden Tabellen ist der unsichere Wert für 500 μμ (siehe Tab. 23) benützt. Es sind deshalb noch die Temperaturen berechnet, wie sie sich unter Auslassung dieses schlechten Wertes ergeben.

Tabelle 27.

Vergleichs-wellenlgn.	Temperatur optisch	Temperatur thermoel.	Fehler	
660/460	—		—	—
660/480	1466°	1477°	— 11°	0,8 %
	1466°	1477°	— 11°	0,8 %

Tabelle 28.

Vergleichs-wellenlgn.	Temperatur optisch	Temperatur thermoel.	Fehler	
660/460	1689°	1698°	— 9°	0,6 %
660/480	1693°		— 5°	0,3 %
	1691°	1698°	— 7°	0,5 %

Nebenbei konnte aus den Werten der Tabellen 17 und 23 die schwarze Temperatur der Nernstlampe (bezw. der Mattscheibenstrahlung) berechnet werden.

Tabelle 29.

Schwarze Temperatur der Nernstlampe aus Tab. 17.

Vergleichswellenlängen	Temperatur abs.
660/480	2384°
660/500	2355°
	2369° als Mittel

Tabelle 30.

Dasselbe aus Tab. 23.

Vergleichswellenlängen	Temperatur
660/460	2299°
660/480	2295°
	2297° abs. als Mittel

Der zweite Wert weicht vom ersten um 72°, bezw. 3 % des ersten Wertes ab. Aus beiden ergibt sich ein Mittelwert von 2333° abs. oder 2060° Celsius. Die wirkliche Temperatur muß höher liegen, da die Strahlung der Nernstlampe nicht „schwarz" ist. Es möge nochmals erwähnt werden, daß dieser Wert für 200 Volt gilt.

Tabelle 31.

Fernrohr	λ_1	λ_2	Spaltbr. I	Spaltbr. II	Intensitätsverh. I/II oder II/I Fehler in %			Tourenzahl	Bemerkungen	
37,40	660	556	40	11,7	6,0	3,419	3,585	293	leicht	Rechts
			60	16,0	2,9	3,750		312		
32,20	556	494	6,6	100	4,0	0,066	0,066	263	schwer	
			9,9	150	1,1	0,066		260		
21,35	555	660	11,6	40	2,3	3,448	3,515	307	zl. leicht	Links
			16,3	60	4,6	3,681		315		
26,35	493	555	10 0		5,4	7,4	0,054	225		
			150		7,7	2,6	0,052	247		

Zuletzt wurde noch eine Messung bei geringerer Helligkeit ausgeführt. Die erste Nernstlampe brannte bei 180 Volt. Es konnten nur drei Punkte der Helligkeitskurve bestimmt werden, da im kurzwelligen Ende die Intensität zu schwach war. Um festzustellen, ob mit einer geringeren Anzahl von Einstellungen auch brauchbare Resultate erzielt werden können, wurden statt je fünf Einstellungen nur zwei gemacht. Die Messungen sind bei 6 mm Spaltabstand ausgeführt.

Tabelle 32.

λ	log H_λ Rechtsst.	log H_λ Linksst.	log H_λ Mittelw.	log R Red. Fakt.	log H_λ reduz.	log E_λ	log J_λ
660	4,000	4,000	4,000	— 0,154	3,846	0,959—2	4,887
493	3,360	3,270	3,315	0,307	3,622	0,632—1	3,990

Der Vergleich zwischen Nernstlampe und schwarzem Körper (bei 1709° abs.) mittels des Spektralphotometers von König-Martens lieferte folgende Vergleichswerte

λ	2 log tg α
660	0,997
500	0,605
480	0,562
460	0,510

Hieraus wurde der zu $\lambda = 493$ μμ gehörige Wert von 2 log tg α interpoliert.

Tabelle 33.

λ	log J_λ	2 log tg α	log S_λ
660	4,887	0,997	5,884
493	3,990	0,590	4,580

Die Temperatur ergibt sich daraus zu 1678° abs., während die mit dem Thermoelement gemessene Temperatur 1709° betrug. Die berechnete Temperatur war also um 31°, bezw. 1,9 % der gemessenen zu niedrig.

Für die schwarze Temperatur der Nernstlampe bei 180 Volt erhält man aus Tabelle 31

2123° absolut

gemessen.

Die Abweichungen der optisch bestimmten Temperaturen von den thermoelektrisch gemessenen Werten betragen 0,5 bis 1,9 %. Sie dürften sich auf 1 % reduzieren lassen, wenn größere Helligkeiten zur Verfügung stehen; denn im violetten Ende wurde die Genauigkeit der Einstellungen nicht nur durch die Fluoreszenzerscheinungen im Auge sondern auch durch die geringe Helligkeit beinträchtigt. Gerade während der Messungen, bei denen der Fehler die Größe von 1,9 % erreicht, brannte die Nernstlampe bei 180 Volt, gab also wenig Licht. Die Einstellungen im kurzwelligen Teile des Spektrums waren infolgedessen sehr ermüdend. Außerdem steht zu vermuten, daß bei größerer Helligkeit die störenden Fluoreszenzerscheinungen nicht mehr so in den Vordergrund treten werden.

Hätte der „schwarze Körper" direkt photometriert werden können, so hätte man bei viel größeren Helligkeiten messen können, weil dann die stark absorbierende Mattscheibe in Wegfall gekommen wäre. In der Praxis, bei der Messung von Hochofentemperaturen, kann die strahlende Öffnung groß genug gemacht werden, so daß genügende Helligkeit vorhanden ist. Eine Bedingung für die Brauchbarkeit dieses Pyrometers ist, daß die Empfindlichkeit des Beobachters konstant ist. Um über diesen Punkt Aufschluß zu erhalten, stellte der Verfasser Kontrollmessungen an, die sich über die Zeitdauer der übrigen Messungen verteilten. Es wurden an verschiedenen Tagen, und am selben Tage zu verschiedenen Zeiten, ein und dieselben Messungen ausgeführt; es zeigte sich, daß die Empfindlichkeit sich mit der Zeit nicht änderte. So ergab z. B. die Einstellung bei gleich breiten Spalten auf gleiche Helligkeit folgende Resultate:

am 1. 10. 09	568,0 μμ	608,4 μμ	Rechtsstellung
= 2. 10. 09	567,0 μμ	607,0 μμ	
= 3. 10. 09	569,7 μμ	613,6 μμ	Linksstellung
= 4. 10. 09	570,0 μμ	614,0 μμ	

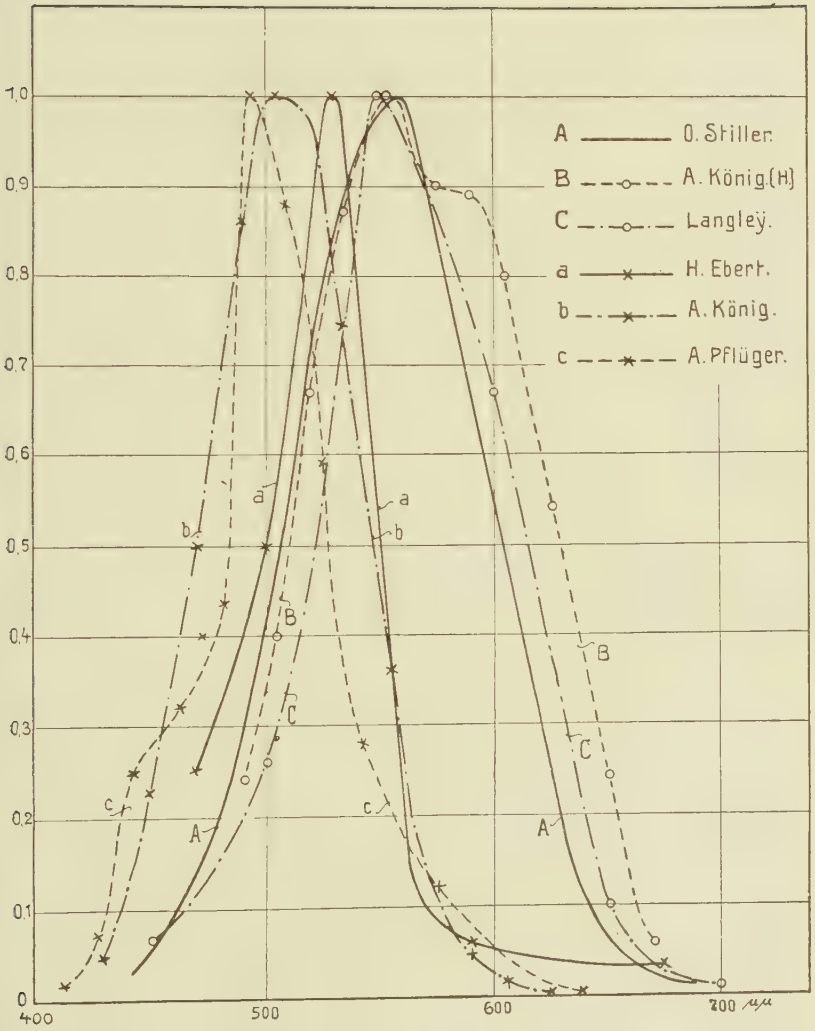
Dabei dürfen natürlich nicht die Resultate für Rechtsstellung mit denen für Linksstellung verglichen werden.

Zusammenfassung der Resultate.

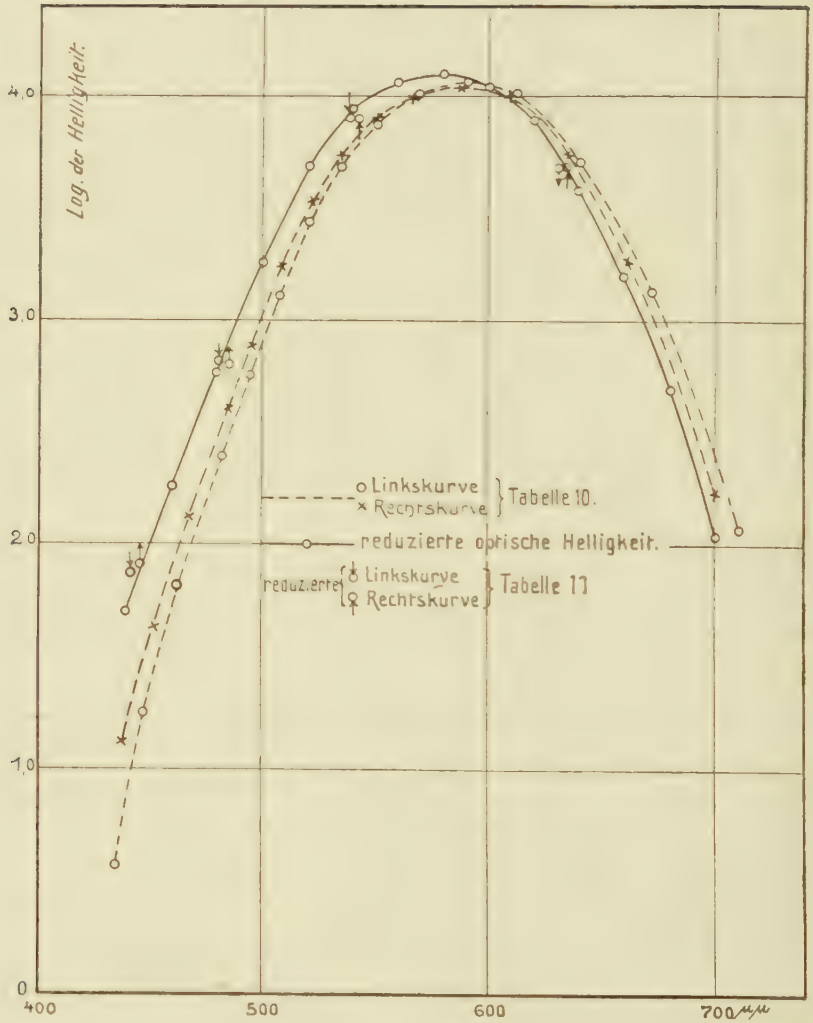
1. Es wurde die Helligkeitsempfindlichkeit des Auges für Spektralfarben unter Benützung der genau bekannten Intensitätsverteilung des elektrisch geglühten „schwarzen Körpers" ermittelt. Die Anwendung des Flickerprinzips auf Spektralfarben, die bisher nicht möglich war, gestattete gegenüber den bei früheren Untersuchungen angewandten Methoden eine große Genauigkeit bei den Einstellungen. Dieser Teil der Arbeit ist im wesentlichen eine Wiederholung der noch nicht veröffentlichten Untersuchungen von O. Stiller. Ferner wurde gezeigt, daß die erhaltene Kurve die Empfindlichkeitskurve der Zapfen darstellt, daß man bei der vorliegenden Versuchsanordnung also von der Helligkeit unabhängig ist, d. h., daß das Purkinjephänomen die Messungen nicht störend beeinflußt. Ebenso

wurde nachgewiesen, daß die Helligkeitsempfindlichkeit des Auges (für die fovealen Teile) sich von einem Tage zum anderen nicht merklich ändert. Daraus folgte — bei Anwendung kleiner Felder — die Brauchbarkeit des Lummer-Pringsheimschen Flickerphotometers als Pyrometer.

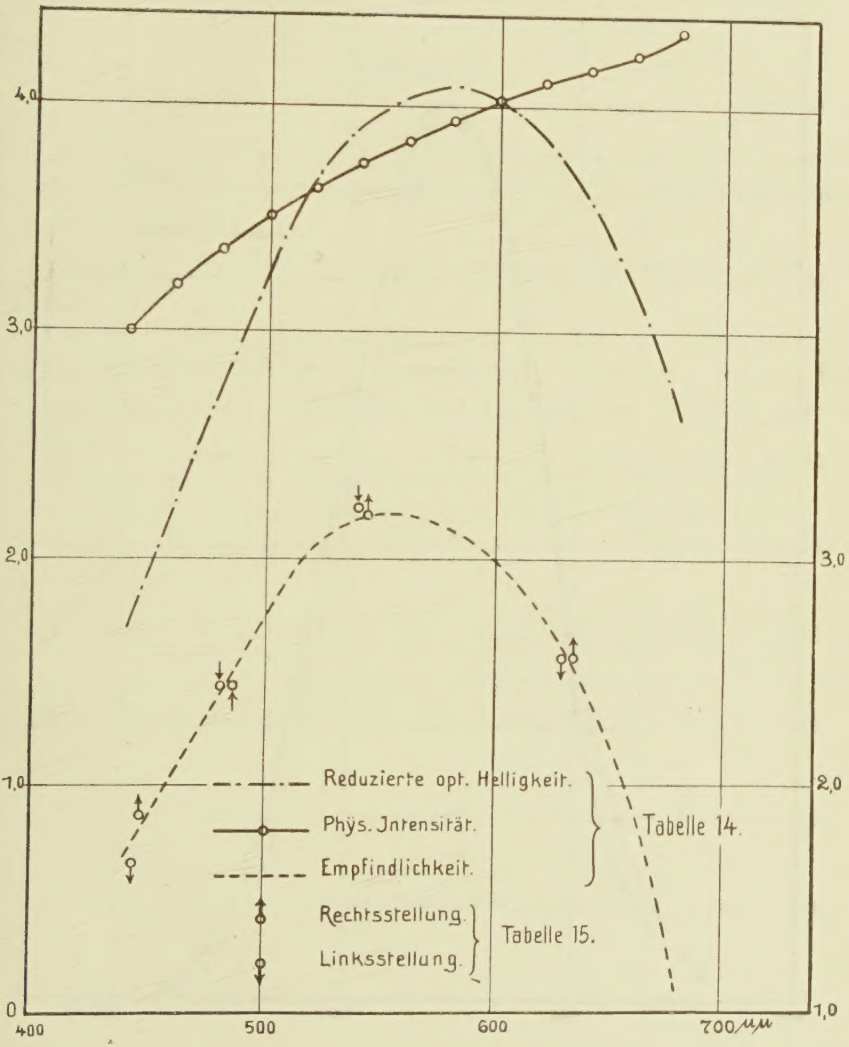
2. Es wurde bei zwei verschiedenen Helligkeitsstufen die Temperatur des „schwarzen Körpers" auf optischem Wege und gleichzeitig mit dem Thermoelement bestimmt. Die aus den photometrischen Einstellungen berechneten Temperaturen wichen von den thermoelektrisch gemessenen um 0,5 bis 1,9 % ab. In der Praxis — bei der Bestimmung von Hochofentemperaturen — dürfte sich der Fehler auf 1 % reduzieren lassen.


A O. Stiller.
B A. König (H.)
C Langley.
a H. Ebert.
b A. König.
c A. Pflüger.
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
400
500
600
700 μμ

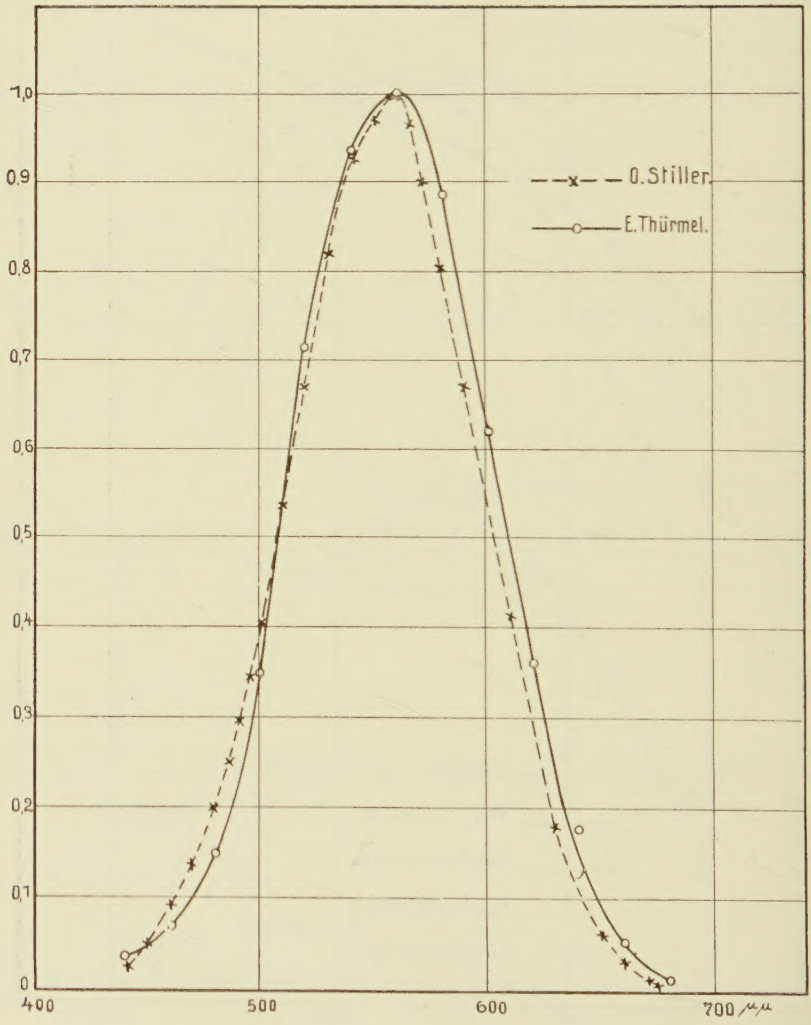
Figur 1.


Log. der Helligkeit.
4.0
3.0
2.0
1.0
0
400
500
600
700 μμ
Linkskurve
Rechtskurve
Tabelle 10.
reduzierte optische Helligkeit.
reduzierte
Linkskurve
Rechtskurve
Tabelle 11

Figur 2.


4,0
3,0
2,0
1,0
0
400
500
600
700 µµ
3,0
2,0
1,0
Reduzierte opt. Helligkeit.
Phys. Intensität.
Empfindlichkeit.
Tabelle 14.
Rechtsstellung.
Linksstellung.
Tabelle 15.

Figur 3.


1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
400
500
600
700 μμ
O. Stiller.
E. Thürmel.

Figur 4.

Lebenslauf.

Am 17. November 1882 wurde ich, Erich Thürmel, evangelisch-lutherischer Konfession, als Sohn des Eisenbahn-Betriebssekretärs Paul Thürmel zu Breslau geboren.

Ostern 1902 erhielt ich das Reifezeugnis der Oberrealschule zu Breslau.

Am 23. April desselben Jahres wurde ich bei der philosophischen Fakultät der Universität Breslau immatrikuliert.

Ich besuchte die Vorlesungen und Übungen* der folgenden Herren Dozenten:

Baumgartner, v. d. Borne, Freudenthal, Hintze*, Kneser*, Ladenburg, Landsberg*, London*, Lummer*, O. E. Meyer*, Neumann, Pringsheim*, Rosanes, A. Sachs, Cl. Schaefer*, Strecker, Sturm, Waetzmann, v. Wenckstern.

Allen diesen meinen hochverehrten Lehrern spreche ich meinen tiefgefühlten Dank aus, insbesondere den Herren Professoren O. Lummer und E. Pringsheim für die Anregung zu dieser Untersuchung und für das fördernde Interesse, das sie meiner Arbeit entgegenbrachten.